

ESTUDIO PARAMÉTRICO DE UN MODELO DE REACTOR NUCLEAR DE POTENCIA CON INTERACCIÓN SUELO- ESTRUCTURA

PARAMETRIC ANALYSIS OF A NUCLEAR POWER REACTOR BUILDING MODEL WITH SOIL-STRUCTURE INTERACTION

Ahmad E. Guennam^a y Javier L. Raffo^a

^a*Grupo de Mecánica Computacional y Experimental, Facultad Regional Delta, Universidad Tecnológica Nacional, San Martín 1171, 2804 Campana, Argentina, jraffo@frd.utn.edu.ar, <http://www.frd.utn.edu.ar/grupo-de-mecanica-computacional>*

Palabras Clave: Análisis Sísmico, Análisis Estructural, Interacción Suelo Estructura, Estructuras Civiles, Dinámica Estructural.

Resumen. Se presenta un estudio paramétrico del modelo de elementos finitos de un problema de análisis estructural dinámico del edificio de un reactor nuclear con interacción suelo-estructura para analizar el efecto sobre el espectro de aceleraciones resultante en diferentes puntos de la estructura. El modelo incluye al suelo donde se encuentra emplazada la estructura junto con todas sus propiedades mecánicas como amortiguamiento, velocidades de propagación de ondas, densidades, amortiguamientos, distribución de capas. A la vez, el modelo incluye al edificio del reactor con parte del mismo embebida en el suelo. Se destaca que este modelo resuelve la dinámica del sistema suelo-estructura como un único modelo mediante el mallado del suelo, la estructura y la generación de una función de transferencia. Como excitación del sistema se introduce un sismo tipo utilizado en centrales nucleares el cual consiste en un espectro de aceleraciones en las tres direcciones coordenadas. El estudio analiza el efecto del cambio de los resultados ante la variación de las diferentes propiedades del suelo.

Keywords: Seismic Analysis, Structural Analysis, Soil-Structure Interaction, Building Structures, Structural Dynamics.

Abstract. A parametric analysis of the finite element model of a structural dynamic analysis of a nuclear reactor building including the effects of soil-structure interaction to obtain the response spectra is presented. The finite element model includes the removed soil model with its mechanical properties as soil damping, wave propagation velocities, density and soil layer layout. The model also includes the reactor building with its embedded foundation. It is worth noting that this model solves the soil-structure and its transfer function dynamical problem in only one coupled system. The input seismic acceleration spectra is a typical one used in nuclear reactor building seismic analysis applied in the three dimensional coordinates. The effect of varying different soil properties parameters in the building acceleration response spectra is analyzed.

1 INTRODUCCIÓN

A partir de un requerimiento de la Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina, especificado en la Fase 3 del Programa de Evaluación de la Seguridad Sísmica (Seismic Safety Evaluation Programme) el cual dictamina la necesidad de garantizar requisitos de seguridad ante eventos externos que se originaron luego del accidente de Fukushima Daiichi en Japón el 11 de marzo del 2011.

El informe realizado por [Johnson et al. \(2014\)](#) presenta el análisis sísmico del Edificio del Reactor (RB, siglas en inglés) a partir de un espectro de aceleración en cada dirección: dos espectros horizontales y uno vertical, realizado con la combinación de una serie de programas computacionales que incluye al programa CLASSI para tener en cuenta el efecto de interacción del suelo con la estructura (Soil Structure Interaction, SSI).

Nucleoeléctrica Argentina S. A. solicitó al Grupo de Mecánica Computacional de la UTN Fac. Reg. Delta que realice este estudio. Respondiendo al pedido, se utilizó parte del programa SASSI2010 desarrollado por [F. Ostadan y N. Deng \(2012a, 2012b\)](#), con el cual se puede analizar el problema de respuesta sísmica teniendo en cuenta la Interacción Suelo-Estructura. Este programa modela la estructura y el suelo con el método de elementos finitos y resuelve las ecuaciones de movimiento en el dominio de la frecuencia. Por otra parte, se utilizó el programa de elementos finitos multipropósitos desarrollado por el mismo grupo EFEMAS ([Guennam y Raffo, 2014](#)) y programas pre y post procesadores para complementar el estudio.

Mientras el uso del conjunto de programas CLASSI, GLAY y CLAM ([Johnson et al., 2014](#)) requiere la idealización de las fundaciones como rígidas, al usar SASSI2010 no es necesario introducir dicha hipótesis y se puede tener en cuenta un comportamiento más general de las fundaciones. Numerosos trabajos que consideran el efecto de interacción suelo/estructura en edificios de centrales nucleares ante eventos sísmicos presentan validaciones y comparaciones entre los nombrados programas ([Johnson et al., 2007](#); [Short et al., 2007](#); [Stewart et al., 2012](#)).

Como resultado de este estudio se presentan los espectros de respuesta de aceleraciones en diferentes puntos del Edificio del Reactor calculados con el programa SASSI2010. Dichos espectros se comparan con los resultados presentados por [Johnson et al. \(2014\)](#). Debido a que en el nombrado trabajo no se especifican algunos de los parámetros que definen las características del suelo, se realiza un análisis de sensibilidad de los resultados ante diferentes valores de los parámetros relevantes que caracterizan el comportamiento del suelo. Para determinar algunas de las propiedades del suelo se definen valores de referencia a partir de los definidos en estudios previos ([Konno et al., 1995](#); [Ceballos et al., 1995](#); [Ceballos et al., 1998](#); [Prato et al., 1998](#); [Rodari et al., 2013](#)).

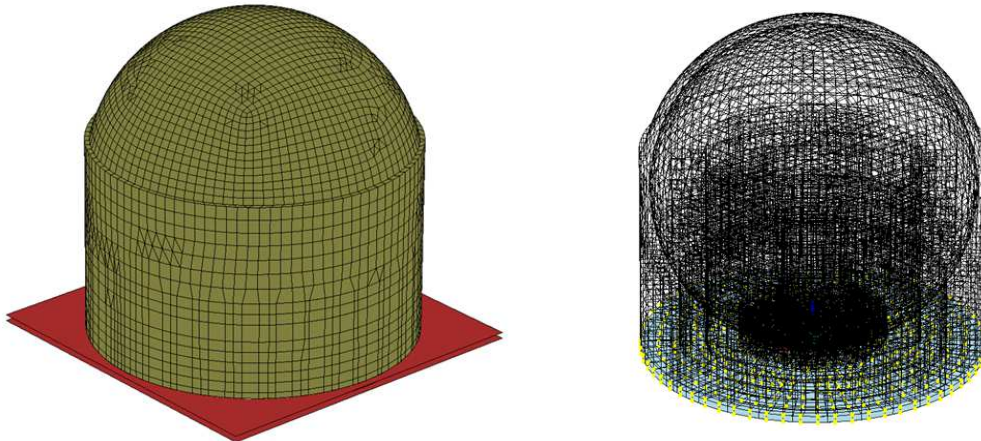
2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO COMPUTACIONAL

El cálculo computacional se realiza por completo con el programa SASSI2010. El pre-procesamiento y pos-procesamiento fueron realizados con programas de desarrollo propio del Grupo de Mecánica Computacional incluyendo al programa EFEMAS que fue optimizado para generar el modelo de elementos finitos en el formato del programa SASSI2010.

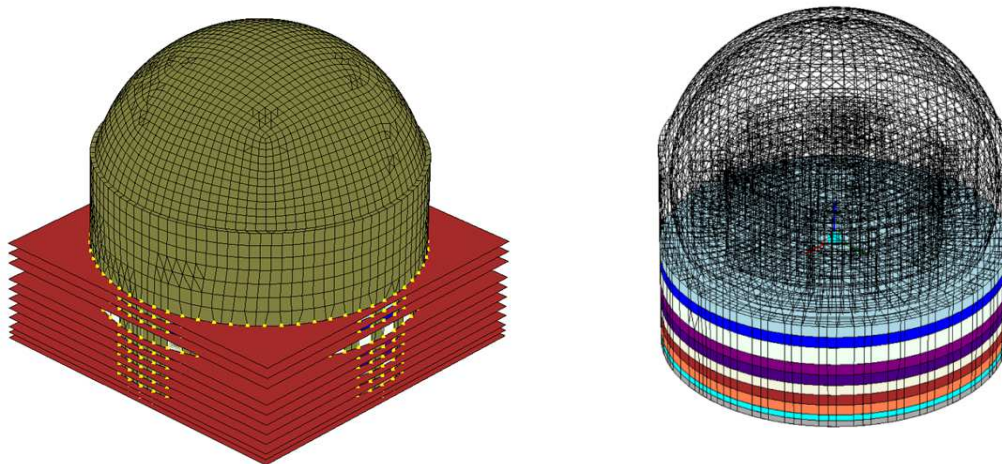
Para tener en cuenta la interacción entre el suelo y la estructura con el programa SASSI2010 se debe modelar, tanto la estructura analizada (incluyendo las fundaciones) como el suelo excavado (suelo removido para emplazar la fundación de la estructura). Un aspecto fundamental a introducir en el modelo corresponde a los nodos de interacción, que definirán la matriz de impedancia, a través de la cual se define la transmisión de movimiento e interacción sísmica suelo/estructura. Se debe observar que el suelo excavado y la estructura completa

funcionan como sistemas acoplados que tendrán su correspondiente respuesta dinámica ante cualquier perturbación.

Para realizar este análisis se realizaron dos modelos, ambos utilizando el mismo modelo de la estructura del Edificio del Reactor pero con diferentes modelos de suelo: El primero corresponde a las condiciones de interacción con una sola capa de suelo (fundación en $Z = -1$ m, ver Figura 1a), consistente con el utilizado por Johnson et al. (2014), el segundo corresponde a las condiciones de interacción con 10 capas de suelo (fundación en $Z = -17.2$ m, ver Figura 1b).



(a) Modelo del Edificio del Reactor con 1 capa de interacción. Fundación $Z = -1$ m.



(b) Modelo del Edificio del Reactor con 10 capas de interacción. Fundación $Z = -17.2$ m.

Figura 1: Composición de los dos modelos de elementos finitos del Edificio del Reactor utilizados en el programa SASSI2010.

El espectro de excitación sísmica se especifica en la superficie del suelo ($z=0$ m) dado que está relacionado con el punto de referencia (medición) de aceleraciones.

En cuanto al modelo del suelo, además de la malla con elementos sólidos de 8 nodos se incluyeron las velocidades de propagación de ondas de presión y corte, amortiguamiento y densidad. Los valores de las propiedades especificados fueron utilizados y mantenidos fijos, mientras que para los parámetros no especificados, se utilizaron valores de referencia definidos en estudios previos (Konno et al., 1995; Ceballos et al., 1995; Ceballos et al., 1998; Prato et al., 1998; Rodari et al., 2013).

El método utilizado para obtener la matriz de impedancia en los nodos de interacción entre el suelo y la estructura es el Método Directo de Volumen Flexible que implementa el

programa SASSI2010 (Direct Flexible Volume Method) desarrollado por F. Ostadan y N. Deng (2012a, 2012b).

La discretización de la malla de elementos finitos del suelo, columnas y el resto de la estructura está verificada para captar las diferentes frecuencias de aceleración del sismo de entrada.

La malla de la estructura está compuesta por elementos de dos nodos para las vigas y tuberías, elementos de 3 o 4 nodos para las cáscaras y lozas y el cimiento cilíndrico con elementos tetraédricos de 4 nodos.

La geometría del edificio es consistente a lo presentado por Johnson et al. (2014). Se verificó que haya coincidencia de masa y geometría. Por otra parte, para tener en cuenta la rigidez del hormigón junto con los refuerzos de acero (armadura) de la estructura, se aumentó un 15% al módulo de Young del hormigón (29487242 kN/m²) y se lo consideró material lineal homogéneo para el análisis.

3 PROPIEDADES DEL SUELO

El suelo se consideró dividido en siete capas que yacen sobre un semi-espacio infinito (halfspace). Para modelar este último, se considera que tiene las mismas propiedades que la última capa de suelo. En la Tabla 1 se presentan las capas con sus correspondientes espesores y en la Figura 2 se presentan las velocidades de propagación de onda de corte de los puntos considerados en el modelo que fueron especificados según la información disponible en Johnson et al. (2014).

Capa de Suelo	z	V_s
1	0	228
	-13	228
2	-13	260
	-20	260
3	-20	281
	-26	281
4	-26	307
	-33	307
5	-33	344
	-41	344
6	-41	417
	-50	417
7	-50	480
	-55	480
Sub espacio	-55	480
	$-\infty$	480

Tabla 1: Capas del suelo y sus correspondientes velocidades de propagación de onda de corte.

Se consideraron las siguientes propiedades del suelo definidos en estudios previos (Konno et al., 1995; Ceballos et al., 1995; Ceballos et al., 1998; Prato et al., 1998; Rodari et al., 2013): Peso específico del suelo, 19 kN; Coeficiente de Poisson del suelo, 0.35; Amortiguamiento de ondas de corte, 0.05; Amortiguamiento de ondas de presión, 0.05.

4 CARACTERÍSTICAS DE LA EXCITACIÓN SÍSMICA

El punto de referencia de la excitación sísmica se lo considera ubicado en la superficie del

suelo ($z=0$ m). El sismo se introduce como aceleraciones relativas a la gravedad, g , en función de la frecuencia, f (espectro de aceleraciones). El sismo de entrada es el correspondiente al presentado por [Johnson et al. \(2014\)](#) y aprobado por el ARN (Autoridad Regulatoria Nacional) para la zona de Atucha I. El mismo se presenta en la [Figura 3](#). Este espectro es aplicado en las tres direcciones cartesianas (x , y , z) del modelo que se indican en la [Figura 1](#).

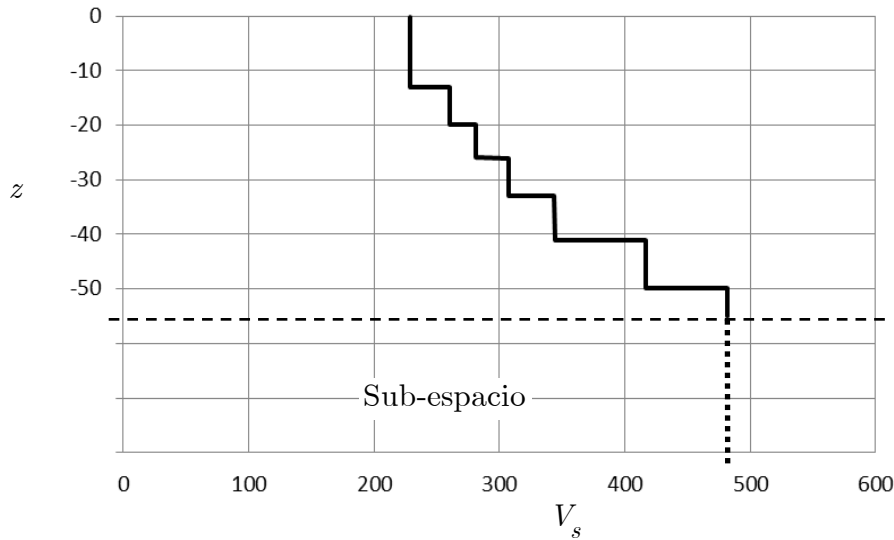


Figura 2: Velocidad de propagación de la onda de corte en función de la profundidad.

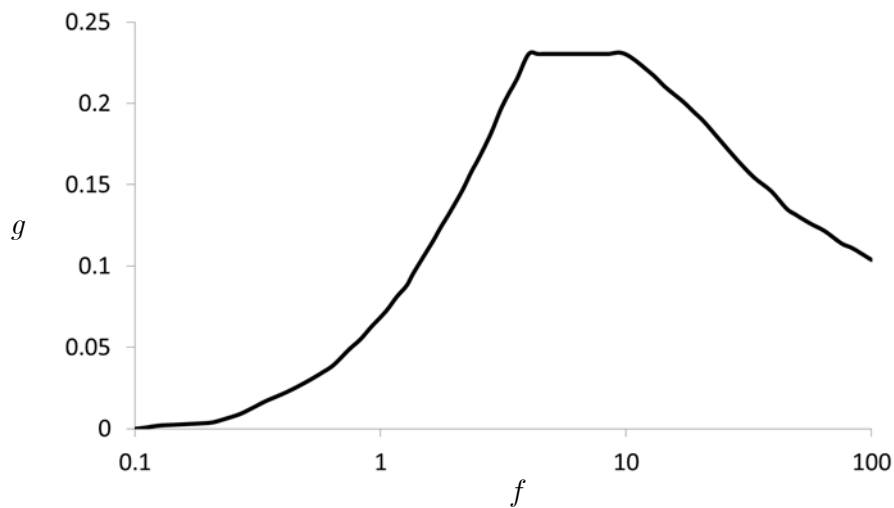


Figura 3: Espectro de aceleraciones utilizado por [Johnson et al. \(2014\)](#).

5 RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIONES

Para realizar una comparación de resultados entre los obtenidos por [Johnson et al. \(2014\)](#) y los del presente trabajo se seleccionaron solo algunos nodos indicados en la [Tabla 2](#) y se compara el espectro de aceleración resultante ante la excitación sísmica de la [Figura 3](#).

Descripción	Nodo	x	y	z
Nodos Cercanos a columna	46	0.0	0.0	-17.2
x=0, y=0	7207	4.2	0.0	0.5
	11392	5.3	0.0	15.4
	13508	0.0	0.0	34.8

Tabla 2: Coordenadas de los nodos del Edificio del Reactor donde se realizan las comparaciones de los espectros de aceleración obtenidos por Johnson et al. (2014) con los del presente trabajo.

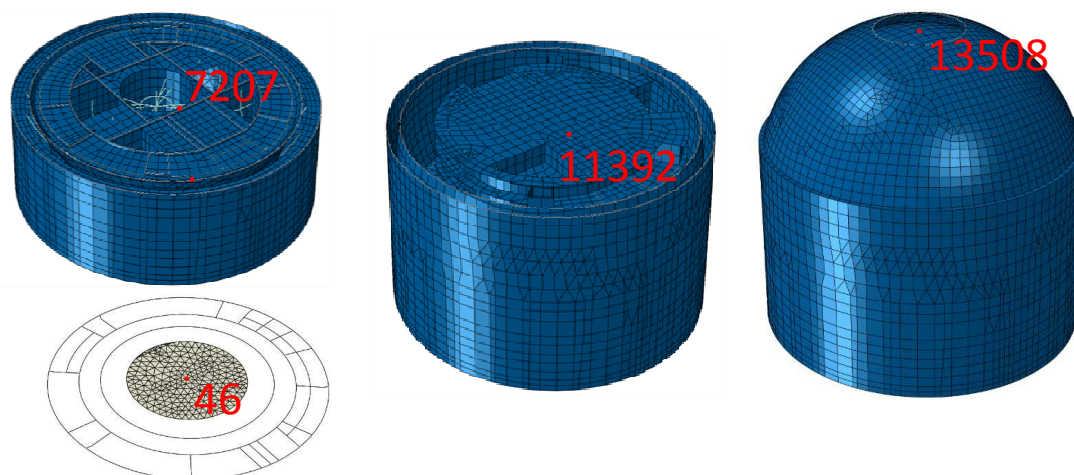


Figura 4: Ubicación de los nodos donde se realiza la comparación de los espectros de aceleración resultante entre los valores de Johnson et al. (2014) y los del presente trabajo. Vista de cortes con planos horizontales ubicados en alturas crecientes en Z.

En la Figura 5 se presenta la comparación de los espectros de aceleración resultantes entre los presentados por Johnson et al. (2014), el modelo de 1 capa y el de 10 capas de suelo de este trabajo, en las dirección X. Se destaca que solo se presentan resultados en esta dirección para no ser excesivos con los resultados presentados.

Se destaca la diferencia de amplitudes observada entre los dos modelos analizados. El modelo de 10 capas considera explícitamente la profundidad de fundación de -17.2 m con la definición de puntos de interacción entre el suelo y la estructura en toda la zona enterrada. Por otra parte, el modelo de 1 capa resulta más consistente con el modelo utilizado por Johnson et al. (2014).

En lo que sigue se llama modelo m0 al modelo de 10 capas el cual es tomado como referencia para el análisis de variación de parámetros de propiedades del suelo. En la Tabla 3 se presenta el valor del parámetro modificado de cada modelo respecto al modelo m0. Las cuatro columnas del final indican los modelos que se comparan entre sí para visualizar el efecto de la variación de amortiguamiento, densidad, módulo de Poisson y velocidad de propagación de ondas de corte, respectivamente.

Se presentan, a continuación, los resultados y comparaciones correspondientes a los cuatro grupos indicados en la Tabla 3.

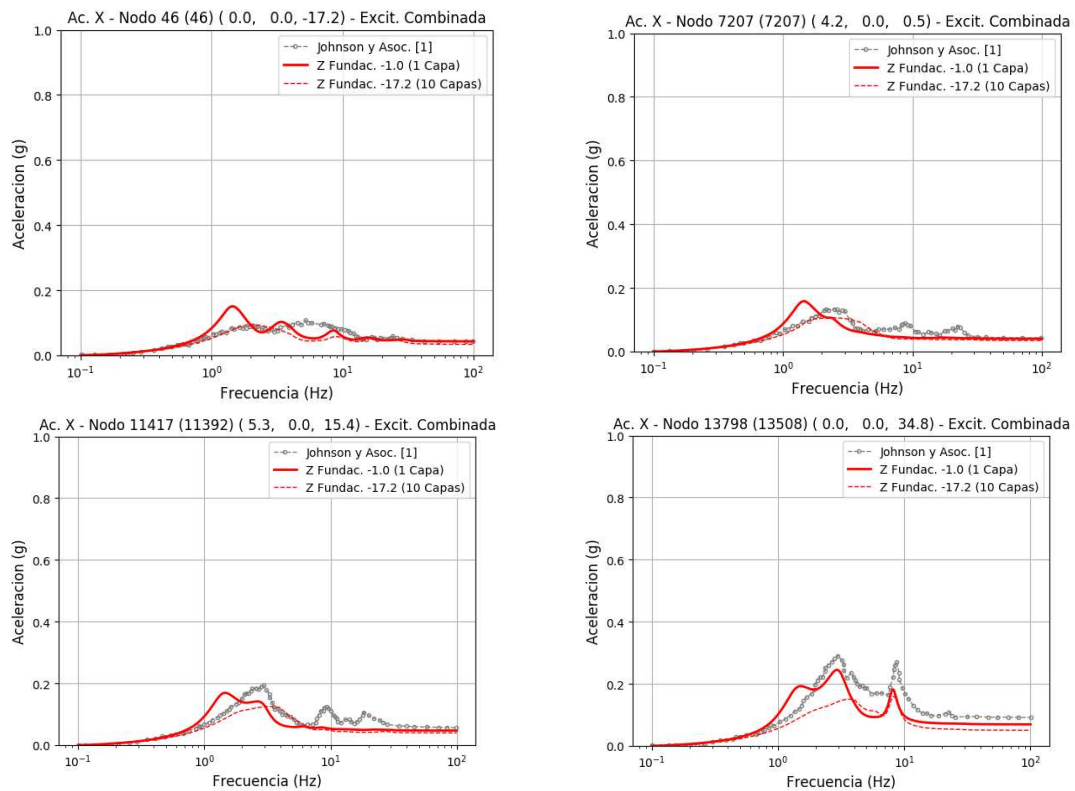


Figura 5: Comparación del espectro de aceleración resultante en dirección X entre los resultados de Johnson et al. (2014) y los modelos de 1 y 10 capas de este trabajo.

Efecto del amortiguamiento del suelo

En la Figura 6 se presenta la comparación de los espectros de aceleración resultantes entre los modelos m0, m1, m2,m3 y m4 en los nodos 46, 7207, 11392 y 13508 en la dirección X. Estos resultados reflejan el efecto de la variación del amortiguamiento.

Se observa que a medida de que aumenta el amortiguamiento del suelo hay una disminución de la respuesta en frecuencias bajas pero aumenta la respuesta en frecuencias altas.

Modelo	VS	Poisson	Densidad	Amort.	Efecto del amort.	Efecto de la densidad	Efecto del módulo de Poisson	Efecto de VS
m0	229	0.4	0.19	0.05	X	X	X	X
m1	229	0.4	0.19	0.075	X			
m2	229	0.4	0.19	0.1	X			
m3	229	0.4	0.19	0.15	X			
m4	229	0.4	0.19	0.2	X			
m5	229	0.4	0.22	0.05		X		
m6	229	0.4	0.24	0.05		X		
m7	229	0.48	0.19	0.05			X	
m14	229	0.2	0.19	0.05			X	
m15	298	0.2	0.19	0.05				X

Tabla 3: Descripción de cada modelo donde se indica el valor del parámetro del suelo modificado. El modelo m0 es el de referencia y corresponde al modelo de 10 capas anteriormente visto.

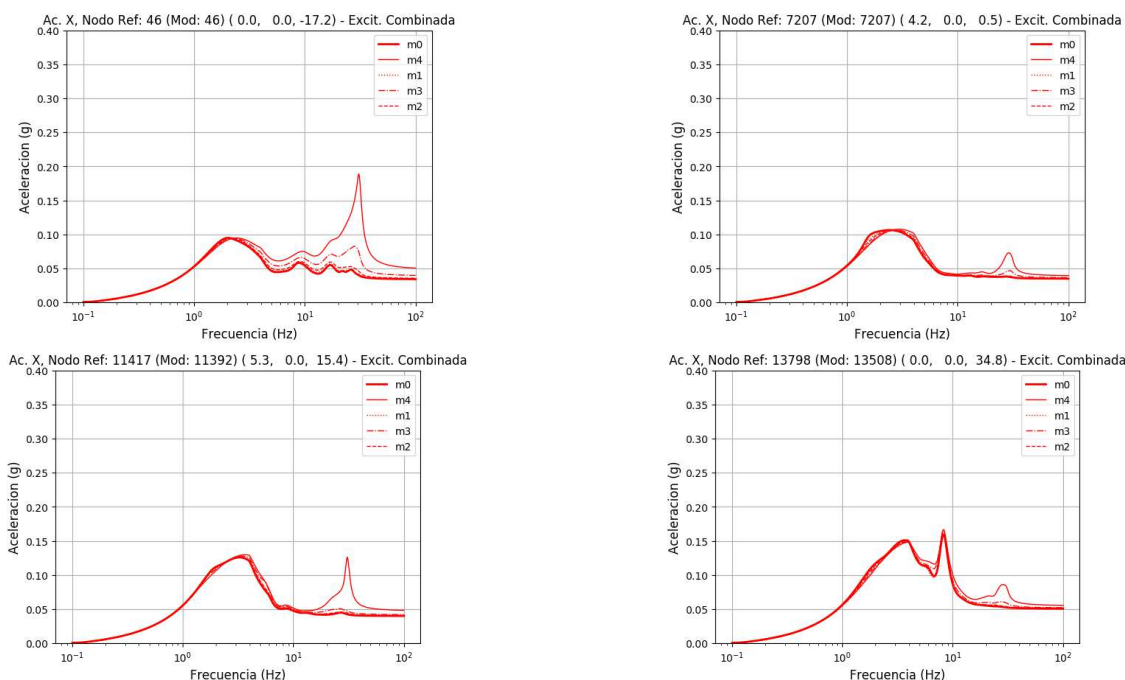


Figura 6: Comparación del espectro de aceleración resultante en dirección X de los nodo 46, 7207, 11392, 13508 entre los resultados de los modelos m0, m1, m2, m3 y m4 variando solo el amortiguamiento del suelo.

Efecto de la densidad

En la Figura 7 se presenta la comparación de los espectros de aceleración resultante correspondiente a los modelos m0, m5 y m6 para los nodos 46, 7207, 11392, 13508 en la dirección X.

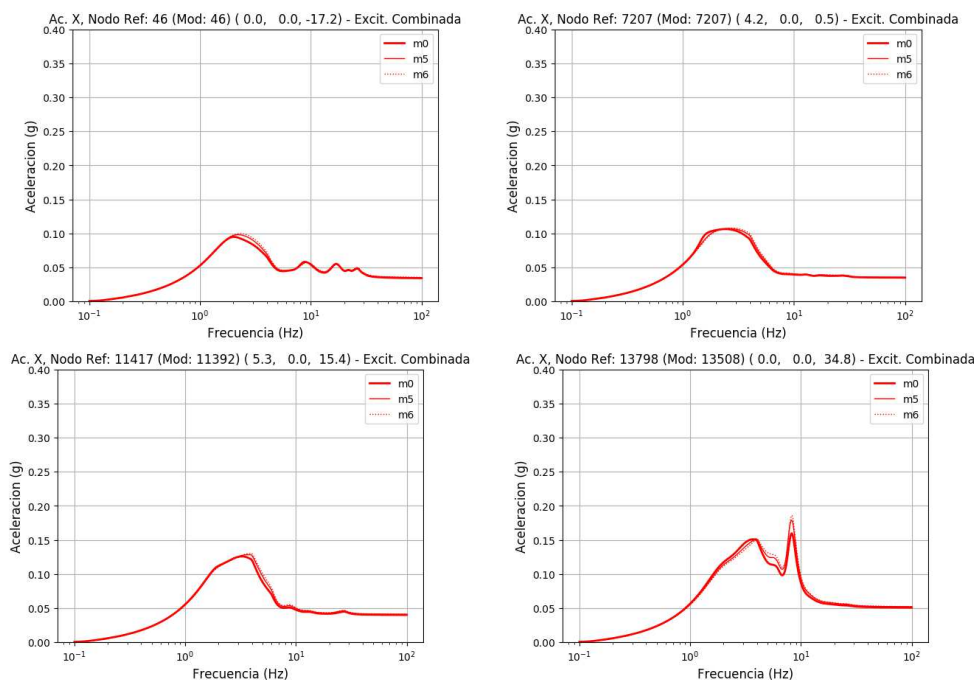


Figura 7: Comparación del espectro de aceleración resultante en dirección X de los nodo 46, 7207, 11392, 13508 entre los resultados de los modelos m0, m5 y m6 variando sólo la densidad.

Se observa que, para este caso particular, las variaciones consideradas en la densidad del suelo producen cambios pequeños en la respuesta respecto al modelo de referencia, sin

observarse un comportamiento relevante. Podría notarse un pequeño corrimiento hacia las frecuencias más altas del espectro del modelo m0.

Efecto del módulo de Poisson

En la **Figura 8** se presenta la comparación de los espectros de aceleración resultante correspondiente a los modelos m0, m7 y m14 para los nodos 46, 7207, 11392, 13508 en la dirección X. Se observa mayor variación en las frecuencias más altas.

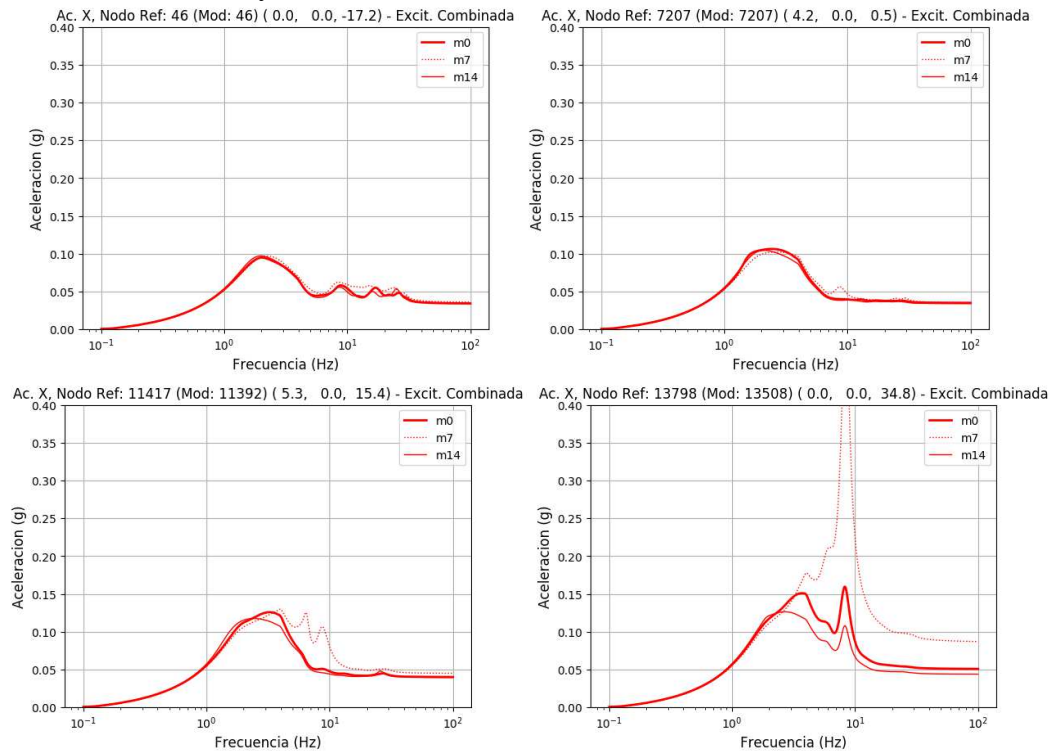


Figura 8: Comparación del espectro de aceleración resultante en dirección Z de los nodo 46, 7207, 11392, 13508 entre los resultados de los modelos m0, m5 y m6 variando sólo el módulo de Poisson del suelo.

6 CONCLUSIONES

Se realizó un análisis de respuesta sísmica del edificio del Reactor de la CNAI teniendo en cuenta la interacción suelo/estructura y se obtuvo el espectro de aceleraciones en diferentes puntos del mismo.

Se presentaron los resultados de la respuesta sísmica de dos modelos del edificio del Reactor utilizando las propiedades de suelo definidas en trabajos previos (Konno et al., 1995; Ceballos et al., 1995; Ceballos et al., 1998; Prato et al., 1998; Rodari et al., 2013) y se los comparó con los resultados de Johnson et al. (2014).

Los resultados muestran una excelente coherencia en la respuesta sísmica si se observa la ubicación de los nodos de la estructura.

Se debe tener en cuenta que las diferencias observadas entre los resultados presentados por Johnson et al. (2014) y los del presente trabajo pueden deberse a que en el primero se utilizó el programa CLASSI que realiza el cálculo de respuesta sísmica considerando a la estructura con una base plana rígida mientras el SASSI relaja esta hipótesis restrictiva. Para mayor información ver Short et al. (2007).

Por otra parte, se destaca la diferencia de amplitudes observada entre el modelo de 10 capas y el modelo de 1 capa que presenta mayor similitud con los resultados presentados por Johnson et al. (2014). Esto es porque en el modelo de Johnson et al. (2014), las condiciones

de contorno utilizadas para obtener el análisis modal necesario para realizar el análisis con CLASSI considera al Edificio del Reactor con restricción del desplazamiento de los nodos de la losa inferior.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Nucleoeléctrica Argentina S. A. por el estudio solicitado y permitir la publicación del mismo. Este trabajo fue realizado en la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional dentro de los proyectos UTN 3487 y 4417.

REFERENCIAS

- Ceballos M. A., Car E. J., Prato T. A., Prato C. A. and Alvarez L. M., Experimental and Numerical Determination of the Dynamic Properties of the Reactor Building of Atucha II NPP, *Nuclear Engineering and Design*, 182:93-106, 1998.
- Ceballos M. A., Car E. J., Prato T. A., Prato C. A., Alvarez L. M. and Godoy A. R., Experimental and Numerical Determination of the Dynamic Properties of the Reactor Building of Atucha II NPP, *Proceeding of SMiRT 13*, 311-327, 1995.
- Guennam A. E. y Raffo J. L. Programa EFE+ (EFEMAS) de Elementos Finitos., Grupo de Mecánica Computacional, Fac. Reg. Delta, UTN. Web del programa y solver www.efemas.com, 2014.
- Johnson J. J. and Associates, *Seismic Safety Evaluation Programme of the Atucha I NPP (CNAI) – Argentina. Phase 3 – Seismic Dynamic Response of Building Structures and In-Structure Response Spectra Calculations. Volume II.1: CNAI General Approach and CNAI Reactor Building*, Presented to: Nucleoeléctrica Argentina S. A., 252 pages, 2014.
- Johnson J. J., Short S. A. and Hardy G. S., Modeling Seismic Incoherence Effects on NNP Structures: Unifying CLASSI and SASSI Approches, *Transactions SMiRT 19*, paper K05/5, 2007.
- Konno T., Uchiyama S., Alvarez L. M., Godoy A. R., Ceballos M. A. and Prato C. A., Full Scale Dynamic Test of Atucha II NPP, International Nuclear Information System IAEA, *Proceeding of SMiRT 13*, 289-309, 1995.
- Ostadan, F. and Deng, N., *SASSI 2010 User's Manual: A System for Analysis of Soil-Structure Interaction*, University of California at Berkeley CA., 2012a.
- Ostadan, F. and Deng, N., *SASSI 2010 Theoretical Manual: A System for Analysis of Soil-Structure Interaction*, University of California at Berkeley CA., 2012b.
- Prato C. A., Konno T., Uchiyama S., Alvarez L. M., Godoy A. R. and Ceballos M. A., Full Scale Dynamic Test of Atucha II NPP, *Nuclear Engineering and Design*, 179:225-243, 1998.
- Rodari R., Zabala F. and Navarta G., Generation of Floor Response Spectra for Atucha II NPP, *Proceeding of SMiRT-22*, 10 pages., 2013.
- Short S., Hardy G., Merz K., Johnson J. J., Program on Technology Innovation: Validation of CLASSI and SASSI Codes to Treat Seismic Wave Incoherence in Soil-Structure Interaction (SSI) Analysis of Nuclear Power Plant Structures, *Electrical Power Research Institute Report*, 1015111, Palo Alto, CA, 2007.
- Stewart J., Crouse C.B., Hutchinson T. C., Lizundia B., Naeim F., Ostadan F., Soil-Structure Interaction for Building Structures, *National Institute of Standards and Technology*, 12-917-21, 2012.